

**АКАДЕМИЯ НАУК РЕСПУБЛИКИ УЗБЕКИСТАН
ИНСТИТУТ ЯДЕРНОЙ ФИЗИКИ**

На правах рукописи

УДК 539.19

ЯЛЫШЕВ ВАДИМ ШАМИЛОВИЧ

**МАГНИТОСОПРОТИВЛЕНИЕ И ТЕМПЕРАТУРА КЮРИ
ПОЛУПРОВОДНИКОВ GaAs, ЛЕГИРОВАННЫХ ИОНАМИ Mn.**

Специальность 01.04.07 – физика твердого тела

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание ученой степени
кандидата физико-математических наук

Ташкент-2006

Работа выполнена в Отделе теплофизики Академии наук Республики
Узбекистан

Научный руководитель: доктор физико – математических наук
Юлдашев Ш.У.

Официальные оппоненты:

доктор физико-математических наук,
Абдурахманов К.П.

доктор физико-математических наук,
Игамбердыев Х.Т.

Ведущая организация: Физико-Технический Институт АН РУ

Защита состоится “_2_” __марта__ 2006г. в _10_ часов на заседании
Специализированного Совета Д 015.15.01 при Институте Ядерной
Физики АН РУ по адресу: 702132 г. Ташкент, пос. Улугбек, ИЯФ АН
РУ, тел.: (998-712) 60-61-18; факс: (998-712) 64-25-90.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке Института Ядерной
Физики АН РУ и Фундаментальной библиотеке АН РУ.

Автореферат разослан “_1_” __февраля__ 2006 г.

Ученый секретарь
Специализированного совета
доктор физ.-мат. наук

Хидиров И.

1. ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность проблемы исследования. В последние годы в электронике наблюдается прорыв в область нанотехнологий, где характерные размеры компонентов оказываются сопоставимыми с дебройлевской длиной волны электрона в кристаллической решетке, когда в полную силу начинают проявляться квантовые эффекты, которые могут нарушить нормальную работу существующих электронных приборов или даже сделать их полностью нефункционирующими. Наряду с этим, а так же с увеличением плотности размещения все возрастающего числа транзисторов в больших интегральных схемах, приходится считаться с эффектом избыточного рассеивания тепла. Вследствие чего, в настоящее время, проводятся интенсивные разработки альтернативных электронных приборов и устройств, а также методов использующих квантовые эффекты. Одним из таких методов является манипулирование ранее неиспользуемым свойством электрона - его спином, что привело к возникновению спинтроники - новой области науки, изучающей целенаправленное управление спинами электронов. Целью и задачей этой новой отрасли науки является создание приборов и устройств, в которых наряду с зарядом носителей одновременно использовался бы и их спин. Уже сегодня успешно используется сравнительно недавно открытый в наноструктурах эффект гигантского магнитосопротивления, который нашел применение в современных магнитных головках компьютеров. Используя, кроме заряда электрона, его спин, можно улучшить параметры и многих других полупроводниковых приборов. Например, спиновый транзистор, который будет усиливать полезный сигнал не за счет увеличения протекающего тока, а с помощью увеличения количества электронов с одинаковым направлением их спина, при этом не изменяя величину самого тока. Поэтому для новой области физики твердого тела - спинтроники, актуальным является изучение законов переноса спина в твердых телах и твердотельных гетероструктурах. Созданию спинтронных приборов, в настоящее время, препятствует то, что явление магнетизма в полупроводниках наблюдается лишь при температурах значительно ниже комнатной температуры. А получение магнитных полупроводников на основе широко используемых в электронике материалов, таких как кремний, германий, препятствует чрезвычайно малая растворимость магнитных примесей (Mn, Fe, Co, Ni и т.д.) в данных материалах (до 10^{18}см^{-3}). Вместе с тем, в GaAs предел растворимости атомов переходных металлов на два порядка превышает предел их растворимости в кремнии и германии. Наряду с этим, для всех устройств спинтроники необходимо иметь достаточно большую длину пробега спина без потери его ориентации. Оказалось, что эта величина наибольшая у арсенида галлия (до 100 мкм). В связи с этим, в настоящее время усиленно проводятся исследования возможности создания ферромагнитных полупроводников с комнатной температурой Кюри на основе полупроводниковых соединений типа A^3B^5 , таких как GaAs и GaN. Так как ферромагнетизм в этих материалах обеспечивается косвенным

обменом между свободными носителями заряда и магнитными ионами, то для повышения температуры Кюри необходимо, наряду с увеличением концентрации магнитных ионов, также значительно увеличить концентрацию свободных носителей заряда.

Таким образом, изучение влияния дополнительного легирования немагнитной примесью магнитных полупроводников на основе GaAs является чрезвычайно важной и актуальной задачей, так как позволяет оценить теоретическую возможность создания на этом материале магнитного полупроводника с температурой Кюри выше комнатной, что позволило бы использовать магнитные явления, не присутствующие в традиционных немагнитных полупроводниках, для применения в различных оптических и электронных устройствах нового поколения.

Степень изученности проблемы. Практически все теории, предлагающие механизмы возникновения ферромагнетизма в разбавленных магнитных полупроводниках, находятся пока в стадии интенсивного исследования. Поэтому во многих случаях еще не существует единой точки зрения, которая могла бы быть положена в основу однозначной теоретической трактовки различных аспектов проблемы магнитных полупроводников. Так же, наряду с разработкой теории ферромагнитных полупроводников идет интенсивное развитие технологии получения магнитных материалов на основе различных полупроводников и накопление экспериментальных результатов, которые могут пролить свет на механизмы и природу ферромагнитного упорядочения в них.

Связь диссертационной работы с тематическими планами НИР. В основу диссертации положены результаты научных исследований, выполненных в Отделе теплофизики АН РУз в соответствии с контрактами ФПФИ АН РУз: № 37-02 “Исследование процессов инжекции, переноса и механизмов спиновой релаксации спин-ориентированных носителей заряда в полупроводниковых квантово-размерных структурах” - 2002-2003г. и № 42-00 “Исследование квантоворазмерных структур на основе полупроводников и механизмов излучательной рекомбинации в них” - 2000-2001г.

Целью диссертационной работы является исследование возможности повышения температуры Кюри разбавленных магнитных $\text{Ga}_{0.965}\text{Mn}_{0.035}\text{As}$ полупроводников путем увеличения концентрации свободных носителей, а также исследование магнитосопротивления образцов GaAs, содержащих магнитные нанокластеры MnAs. В связи с этим были поставлены следующие задачи:

1. Провести исследование влияния концентрации свободных носителей заряда, введенных дополнительной немагнитной примесью Be, на величину температуры Кюри эпитаксиальных пленок $\text{Ga}_{0.965}\text{Mn}_{0.035}\text{As}$.

2. Исследовать температурную зависимость и влияние внешнего магнитного поля на сопротивление $\text{Ga}_{0.965}\text{Mn}_{0.035}\text{As}$ эпитаксиальных пленок.

3. Из температурной зависимости сопротивления при помощи магнитопримесной модели рассеяния носителей заряда произвести численный

расчет значения энергии обменного взаимодействия между локальными электронами магнитных ионов Mn и свободными дырками в магнитном полупроводнике $\text{Ga}_{0,965}\text{Mn}_{0,035}\text{As}$.

4. Исследовать влияние размеров магнитных кластеров MnAs на магнитосопротивление в GaAs полупроводнике.

5. Провести исследование влияния светового воздействия на магнитосопротивление GaAs с магнитными кластерами MnAs.

Направление исследований. Изучение влияния концентрации свободных носителей заряда на температуру Кюри разбавленных магнитных полупроводников $\text{Ga}_{0,965}\text{Mn}_{0,035}\text{As}$.

Методы исследования: сверхпроводящий квантовый интерферометр (SQUID), эффект Холла, магнитосопротивление, атомный и магнитный силовые микроскопы.

Достоверность и обоснованность. Достоверность и обоснованность полученных результатов достигались применением широко известных экспериментальных методик и теоретических моделей, проведением статистической обработки экспериментальных данных, а также активным обсуждением материалов данной диссертационной работы на различных международных конференциях и их публикацией в реферируемых научных журналах. Полученные результаты анализировались и сопоставлялись с известными экспериментальными данными других исследователей.

Положения, выносимые на защиту.

1. Эффект увеличения температуры Кюри полупроводниковых эпитаксиальных слоев $\text{Ga}_{0,965}\text{Mn}_{0,035}\text{As}$, при дополнительном легировании их немагнитной примесью Be вследствие повышения энергии обменного взаимодействия, вызванного увеличением количества свободных носителей.

2. Величина энергии обменного взаимодействия между локальными электронами магнитных ионов и свободными дырками в $\text{Ga}_{0,965}\text{Mn}_{0,035}\text{As}$, рассчитанное с помощью магнитопримесной модели рассеяния носителей заряда, примененной к данным магнитным полупроводникам.

3. Эффект положительного магнитосопротивления в p-типе GaAs образцах с наноразмерными магнитными кластерами MnAs.

4. Зависимость величины магнитосопротивления GaAs полупроводников с кластерами MnAs от размеров этих кластеров, связанная с внутренним магнитным полем этих кластеров.

Научная новизна полученных результатов.

1. Обнаружено влияние дополнительного легирования магнитных $\text{Ga}_{0,965}\text{Mn}_{0,035}\text{As}$ эпитаксиальных слоев немагнитной примесью Be на температуру Кюри. При увеличении концентрации свободных носителей, вызванных этим легированием, температура Кюри повышается за счет увеличения энергии обменного взаимодействия между ионами Mn, происходящей посредством свободных носителей.

2. Из измерений температурной зависимости удельного сопротивления эпитаксиальных пленок $\text{Ga}_{0,965}\text{Mn}_{0,035}\text{As}$ с помощью магнитопримесной

модели рассеяния носителей была определена энергия обменного взаимодействия в исследуемых материалах. Из полученного значения величины энергии обменного взаимодействия ($\approx 1,6$ эВ) был сделан вывод о возможности получения магнитного полупроводника $Ga_{1-x}Mn_xAs$ с температурой Кюри, достаточной для создания на его основе новых приборов.

3. Обнаружено влияние размеров магнитных кластеров и фотовозбуждения на магнитосопротивление GaAs образцов с содержащимися в них наноразмерными магнитными кластерами MnAs. Увеличение размеров магнитных кластеров приводит к увеличению магнитосопротивления р-типа GaAs образцов не только за счет уменьшения длины пробега носителей, но и за счет дополнительного рассеяния свободных носителей магнитными полями ферромагнитных кластеров MnAs. Освещение образцов фотонами энергией 1,9 эВ приводит к дополнительному увеличению магнитосопротивления, обусловленное вкладом фотовозбужденных электронов.

Научная и практическая значимость результатов исследования. С помощью исследований, проведенных в данной работе, подтверждено, что основным механизмом ферромагнетизма в разбавленных магнитных полупроводниках $Ga_{1-x}Mn_xAs$ является обменное взаимодействие магнитных ионов Mn со свободными носителями заряда. Поэтому увеличение концентрации свободных носителей приводит к увеличению температуры Кюри данных материалов. Впервые подтвержден механизм рассеяния свободных носителей заряда в вырожденных полупроводниках, в рамках предложенной Э.Л.Нагаевым магнитопримесной модели рассеяния. Исходя из этой модели, впервые показана возможность определения величины температуры Кюри магнитных полупроводников из температурной зависимости сопротивления. Вычисленная величина энергии обменного взаимодействия между локальными электронами магнитных ионов и свободными дырками в $Ga_{0,965}Mn_{0,035}As$ магнитных полупроводниках позволила оценить теоретическое значение величины температуры Кюри в зависимости от концентрации свободных дырок и сравнить ее с экспериментальными данными в указанных материалах.

Реализация результатов. В материалах исследований, представленных в диссертации, показаны возможные методы увеличения температуры Кюри разбавленных магнитных полупроводников, которые могут быть использованы в технологии получения этих материалов.

Апробация работы. Диссертационная работа прошла апробацию на ряде конференций, в частности на Международных конференциях «Проблемы науки и технологии микроструктурированных твердых и мягких материалов», (Самарканд, 2-3 ноября 2000), «Quantum Functional Materials and Devices» (Ташкент, 14-15 октября 2002), «Soft Condensed Matter: Science and Technology» (Ташкент, 30 октября – 1 ноября 2002), Республиканской конференции молодых физиков Узбекистана, Улугбек, Ташкент (ИЯФ, 3-4 декабря 2002).

Публикация результатов. Основное содержание диссертации опубликовано в 6 научных работах, из них: в зарубежном журнале - 2 статьи, в Узбекском физическом журнале - 3 статьи, 1 тезис.

Структура и объем диссертационной работы. Диссертационная работа состоит из введения, трех глав, заключения, приложения и списка литературы (73 наименований). Она изложена на 104 страницах, включая 24 рисунков и 3 таблицы.

Личный вклад диссертанта. В основу диссертации положены результаты научных исследований, выполненных при непосредственном участии автора в Отделе Теплофизики АН РУз и в Квантово Функциональном Исследовательском Центре Донггукского Университета (Корея, Сеул). Личное участие автора в работах, материал которых явился основой диссертации, заключалось в исследовании сопротивления и магнитосопротивления исследуемых образцов, проведению Холловских измерений, обработке, анализе и интерпретации полученных результатов. В диссертации используются результаты исследований, выполненных автором под руководством научного руководителя.

2. ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении обоснована актуальность работы, сформулированы ее цель и задачи, указаны практическая ценность и научная новизна проведенных исследований, определены основные положения, выдвигаемые на защиту, и изложено содержание диссертации.

Первая глава (обзор литературы) посвящена краткому историческому обзору и основным публикациям по созданию и исследованию разбавленных магнитных полупроводников. Более подробно рассматриваются работы, связанные с полупроводниками GaAs, содержащих магнитные ионы Mn. Представлены методы изготовления этих материалов и возникающие при этом проблемы, даны основные достижения для температуры Кюри полученных магнитных полупроводников, приведены модели возникновения ферромагнетизма в данных материалах, изложены методы и подходы, применяемые в исследовании электрофизических и оптических свойств $Ga_{1-x}Mn_xAs$ полупроводников. Также обсуждаются нерешенные вопросы в данной области. На основе анализа литературных данных определены цель и задачи исследования.

Во второй главе описываются исследования GaAs полупроводников с магнитной примесью Mn, введенной с помощью ионной имплантации. Были получены две серии образцов, различающиеся между собой дозами облучения, составляющими $5 \times 10^{15} \text{ см}^{-2}$ и $5 \times 10^{16} \text{ см}^{-2}$. После быстрого термического отжига исследуемых материалов в азотной атмосфере, проводящегося для устранения возникших многочисленных радиационных дефектов, ионы марганца образовали в них магнитные нанокластеры MnAs, причем в образцах с большей дозой облучения размеры кластеров также были больше. Из измерения коэффициента Холла было найдено, что оба образца

имеют р-тип проводимости. Для изучения механизмов рассеяния свободных носителей заряда в данных материалах были проведены измерения магнитного сопротивления. В данных материалах присутствуют два характера изменения удельного сопротивления при внешнем магнитном поле: в сторону увеличения и в сторону уменьшения (рис.1). Для образцов, которые облучались ионами марганца дозой $5 \times 10^{15} \text{ см}^{-2}$ при малых магнитных полях (ниже 2000 G) величина магнитосопротивления уменьшается, но при увеличении напряженности магнитного поля удельное сопротивление растет. Эффект отрицательного магнитосопротивления отнесен к рассеянию спинов свободных носителей на границе полупроводник - ферромагнитный кластер MnAs. Внешнее магнитное поле выравнивает хаотически направленные намагниченности наномангнитных кластеров, уменьшая вероятность рассеяния спинов свободных носителей (дырок) на этих границах. Но при дальнейшем увеличении напряженности магнитного поля, когда магнитные моменты всех кластеров направлены в одну сторону, положительное магнитосопротивление начинает преобладать над вкладом отрицательного эффекта и общее магнитосопротивление начинает увеличиваться. Магнитосопротивление образцов, облученных ионами марганца дозой $5 \times 10^{16} \text{ см}^{-2}$ имеет только положительный характер и его величина намного выше величины первых образцов. Положительный характер магнитосопротивления в исследуемых материалах не может быть объяснен только так называемым геометрическим эффектом магнитосопротивления. Значение магнитного сопротивления во второй серии образцов намного больше по сравнению с образцами первой серии, что может быть связано с размерами магнитных кластеров. Поэтому предложено, что рассеяние носителей заряда происходит вследствие их взаимодействия с магнитными полями кластеров. Намагниченность кластера, в простейшем приближении, зависит от количества магнитных ионов в кластере:

$$M = N_{\text{Mn}} S \mu_B g, \quad (1)$$

где N_{Mn} - это количество ионов марганца в кластере, $S = 5/2$ - спин магнитного иона марганца, μ_B - магнетон Бора и g - фактор Ланде. Таким образом, чем больше кластер, тем больше у него магнитное поле, и рассеяние носителей заряда будет сильнее. Поэтому в образцах с большим количеством марганца эффект увеличения удельного сопротивления в магнитном поле выше. Намагниченность кластера увеличивается с увеличением внешнего магнитного поля, что приводит к увеличению удельного сопротивления в полупроводнике.

Также были проведены измерения магнитосопротивления образцов при освещении их фотонами с энергией 1.9 эВ. В этом случае магнитосопротивление имеет только положительный эффект, т.е. при всех значениях внешнего магнитного поля удельное сопротивление увеличивается, причем величина его выше. Увеличение значений удельного сопротивления

исследуемых образцов при их освещении связано с фотовозбужденными электронами, возникающими в р-типа GaAs полупроводнике. Так как подвижность свободных электронов в GaAs имеют более высокую величину по сравнению с дырками, то и их вклад в магнитосопротивление будет соответственно выше.

В третьей главе приведено исследование магнитных полупроводников $Ga_{1-x}Mn_xAs$, выращенных с помощью технологии молекулярно лучевой эпитаксии при низких температурах ($250^{\circ}C$) роста. Это позволяет избежать образования MnAs кластеров, неизбежных при более высоких температурах выращивания. Температура Кюри (температура ферромагнитного упорядочения) в таких образцах пропорциональна концентрации введенной в них магнитной примеси. Примесь марганца в GaAs полупроводящих пленках является акцепторной примесью, однако, эпитаксиальные пленки GaAs, выращенные при низких температурах ($250^{\circ}C$), являются сильно компенсированным материалом, имеющим в большом количестве донорные дефекты (междоузельные ионы Mn и ионы As на месте галлия). Поэтому концентрация свободных дырок в таком материале составляет примерно 10% от количества введенного марганца. При увеличении концентрации марганца свыше 5%, ионы марганца располагаются в основном в междоузлиях, тем самым увеличивая донорные дефекты. В случаях, когда свободные дырки $(Ga,Mn)As$ эпитаксиальных слоев были практически полностью компенсированы (дополнительным легированием донорами Sn), то они проявили антиферромагнитные свойства. Этот результат говорит о том, что ферромагнитное взаимодействие в этих материалах обусловлено свободными дырками, т.е. ферромагнитное упорядочение происходит за счет косвенного обмена, происходящего между магнитными ионами марганца посредством свободных дырок. Следовательно, температура Кюри в этих материалах помимо концентрации магнитных ионов также сильно зависит от концентрации свободных носителей (дырок), которые увеличивают энергию магнитного взаимодействия между ионами марганца.

Поэтому для увеличения концентрации свободных дырок образцы $Ga_{1-x}Mn_xAs$ дополнительно легировались немагнитной акцепторной примесью Be, которая легко растворяется в данных материалах. Были выращены образцы с различной концентрацией Be, а так же, для сравнения, контрольный образец нелегированный Be. Концентрация марганца во всех образцах была одинакова и составляла 3.5% от общей концентрации катионов. Измеренная температура Кюри в данных образцах увеличивается с увеличением концентрации свободных носителей (дырок), которая в свою очередь связана с увеличением концентрации немагнитной примеси бериллия. Увеличение температуры Кюри в данных материалах происходит за счет увеличения энергии обменного взаимодействия между магнитными ионами марганца. Так как обменное взаимодействие осуществляется посредством свободных носителей заряда, то увеличение последних ведет к увеличению этого взаимодействия.

Для исследования механизма рассеяния носителей и влияния дополнительной немагнитной примеси на температуру Кюри в указанных магнитных полупроводниках были проведены измерения температурных зависимостей удельного сопротивления и магнитосопротивления полученных $\text{Ga}_{0.965}\text{Mn}_{0.035}\text{As}$ образцов (рис.2).

Все образцы имеют характерный пик удельного сопротивления вблизи температуры Кюри. Обычно, такой пик удельного сопротивления наблюдается в большинстве ферромагнитных металлах и ферромагнитных полупроводниках. Также, вблизи температуры Кюри в магнитных полупроводниках наблюдается эффект колоссального отрицательного магнитосопротивления КМС. С учетом экспериментального факта, что пик удельного сопротивления не наблюдается в совершенных ферромагнетиках, а также, что пик сопротивления ферромагнитных полупроводников обязательно связан с их дефектностью, Э. Л. Нагаевым была предложена теоретическая модель для объяснения наблюдаемых пика удельного сопротивления и колоссального магнитосопротивления вблизи температуры Кюри в ферромагнитных полупроводниках, названную им магнитопримесной моделью [1]. Специфика магнитных полупроводников определяется тем, что носители заряда стремятся поддержать в них ферромагнитное упорядочение, ибо оно обеспечивает минимум их энергии. Кулоновское поле ионизированных акцепторов Mn^{++} притягивает свободные носители, вследствие чего увеличивается косвенное обменное взаимодействие вблизи этих магнитных ионов. Так как косвенное обменное взаимодействие ведет к установлению ферромагнитного взаимодействия, то вблизи ионизированных акцепторов Mn^{++} увеличивается локальная намагниченность. Следовательно, случайно распределенная примесь создает не только флуктуации электростатического потенциала, но также статические флуктуации намагниченности, которые дополнительно рассеивают заряженные носители. Когда температура образца повышается выше температуры Кюри, ферромагнитный порядок в кристалле разрушается и тем самым уменьшается рассеяние носителей заряда магнитными флуктуациями. При понижении температуры образца ниже температуры Кюри намагниченность в объеме ферромагнетика выравнивается за счет уменьшения влияния теплового разупорядочения магнитных ионов, вследствие чего уменьшается величина магнитных флуктуаций обусловленных температурным воздействием.

Аналогичный процесс происходит и под действием внешнего магнитного поля, которое стремится установить полную намагниченность (насыщение) во всем материале и потому уменьшает разницу намагниченностей вблизи и вдали от дефектов. Это и является причиной появления эффекта колоссального отрицательного магнитосопротивления в ферромагнитных полупроводниках. Увеличение концентрации свободных носителей добавлением немагнитных акцепторов увеличивает экранирование электростатической флуктуации и, посредством этого, уменьшаются магнитные флуктуации. Анализ взаимодействия носителей заряда с магнитной примесью производится с использованием условия постоянства

электрохимического потенциала и уравнения Пуассона в объеме материала. Отличие от обычного подхода к немагнитным системам состоит в том, что учитывается зависимость энергии носителей от намагниченности кристалла. Суммарное воздействие свободного носителя с электростатическим полем дефекта и избыточной намагниченностью вокруг него дается потенциалом, имеющего форму экранированного кулоновского, но в котором истинная диэлектрическая постоянная ϵ заменена эффективной диэлектрической постоянной ζ , которая связана с истинной диэлектрической проницаемостью соотношением $\zeta = \epsilon(1-\Gamma)$, где Γ это магнитоэлектрическая постоянная, учитывающая зависимость локальной намагниченности от концентрации свободных носителей заряда. В отсутствии внешнего магнитного поля[1,2]:

$$\Gamma = \frac{3k_B T N}{2E_F^+ p} \quad \text{при } T < T_c, \quad (2)$$

$$\Gamma \approx \frac{J_{pd}^4 S^2 (S+1)^2 m^* N^2 k_F p}{4\pi^2 E_F^2 \hbar^2 k_B T} \left[1 - \frac{3k_F a}{4\pi} \right] \quad \text{при } T > T_c, \quad (3)$$

где p – концентрация свободных дырок, μ_B – магнетон Бора, J_{pd} – величина обменного интеграла на один магнитный атом, k_B – постоянная Больцмана, $E_F^+ = 2^{2/3} E_F$ - энергия Ферми в случае полной поляризации дырок по спину, N – концентрация магнитных атомов, g – фактор Ланде ($g = 2$), $S = 5/2$ – спин иона Mn. Полная спиновая поляризация свободных носителей происходит, если обменная энергия намного больше, чем энергия Ферми свободных носителей. Это условие обычно хорошо выполняется в магнитных полупроводниках, особенно для p – типа проводимости. Как видно из формул (2) и (3), с ростом температуры величина магнитоэлектрической постоянной Γ в ферромагнитной области растет, а в парамагнитной области падает. Таким образом, он проходит через максимум в районе T_c , где экспериментально и наблюдается максимум удельного сопротивления. В выражении Брукса-Херринга для удельного сопротивления в случае рассеяния ионизированной примесью в случае магнитных полупроводников истинная диэлектрическая постоянная заменяется так называемой эффективной [3]:

$$\rho = \frac{m^*}{e^2 p \langle \tau_k \rangle} = \frac{e^2 m^{*2} N_I}{8\pi k_F^3 \hbar^3 p \epsilon_0^2 (1-\Gamma)^2} \left[\ln(1+\alpha) - \frac{\alpha}{1+\alpha} \right], \quad \alpha = 4k_F^2 r_s^2. \quad (4)$$

Из температурных зависимостей сопротивления величина магнитоэлектрической постоянной Γ была найдена с помощью теоретического расчета по формуле [3]:

$$\rho(T) = \frac{\rho(0)}{(1-\Gamma)^2}, \quad (5)$$

где $\rho(0)$ сопротивление без учета магнитного взаимодействия.

Из полученного теоретического значения Γ были вычислены значения концентрации ионизированной примеси и обменного интеграла для нелегированных и легированных Ве образцов. Для всех исследуемых образцов получились примерно одинаковые значения обменной энергии $|N \times J_{pd}| \approx 1.6$ эВ. Полученная нами величина обменной энергии для $\text{Ga}_{0.965}\text{Mn}_{0.035}\text{As}$ хорошо согласуется со значением обменной энергии 1.5 эВ, полученной для нелегированного $\text{Ga}_{1-x}\text{Mn}_x\text{As}$ ($x=0.053$) из магнитотранспортных измерений [4]. Магнитопримесная модель рассеяния носителей, предложенная Э.Л.Нагаевым хорошо описывает поведение удельного сопротивления как в парамагнитной, так и в ферромагнитной областях температур, в особенности для сильнолегированных образцов. Максимум флуктуаций намагниченности образцов происходит при температуре Кюри (где начинает формироваться ферромагнитное упорядочение), что и ведет к образованию пика удельного сопротивления при этих температурах. Температура Кюри, в квазиклассическом приближении молекулярного поля, зависит от концентрации магнитных ионов, концентрации свободных носителей заряда (дырок), а также величины обменного интеграла следующим образом [5]:

$$T_c = \frac{S(S+1)NJ_{pd}^2}{8E_F} p. \quad (6)$$

Из этого выражения следует, что температура Кюри повышается с увеличением концентрации свободных носителей заряда (дырок) $T_c \sim p^{1/3}$, так как энергия Ферми $E_F \sim p^{2/3}$. Экспериментально полученные значения температуры Кюри для образцов $\text{Ga}_{0.965}\text{Mn}_{0.035}\text{As}$ находятся в хорошем соответствии с формулой (6).

Так же нами были проведены измерения магнитосопротивления для исследуемых образцов (рис.3). Магнитное поле было приложено перпендикулярно направлению тока. При низких температурах и в малых магнитных полях изменение магнитосопротивления имеет положительный характер, т.е. увеличивается относительно сопротивления при нулевом внешнем магнитном поле, но при дальнейшем увеличении величины напряженности магнитного поля становится отрицательным. При более высоких температурах (вблизи и выше T_c) характер изменения магнитосопротивления всегда отрицательный при любом значении напряженности внешнего магнитного поля. Уменьшение магнитного сопротивления происходит за счет подавления флуктуаций намагниченности, существующих в исследуемых материалах, внешним магнитным полем. Вследствие чего уменьшается рассеяние носителей заряда флуктуациями

намагниченности и проводимость материала увеличивается. Увеличение магнитосопротивления при низких температурах и малых магнитных полях происходит за счет эффекта анизотропного магнитосопротивления (явления преимущественной ориентации спонтанной намагниченности ферромагнетика вдоль кристаллического поля), который часто наблюдается в ферромагнитных металлах. Из проведенных нами исследований следует, что ферромагнетизм в образцах $Ga_{1-x}Mn_xAs$ обусловлен обменным взаимодействием магнитных ионов с участием свободных носителей заряда. Для повышения температуры Кюри в данном материале, необходимо существенно увеличить, как концентрацию самих магнитных ионов, так и концентрацию свободных носителей (дырок).

3. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В заключении сформулированы основные результаты и выводы:

1. Методом ионной имплантации марганца в образцы GaAs с последующим термическим отжигом были получены магнитные нанокластеры MnAs.

2. Магнитосопротивление в данных образцах показало линейную зависимость от напряженности магнитного поля, что обусловлено рассеянием носителей заряда магнитными полями кластеров MnAs.

3. Величина магнитосопротивления GaAs полупроводников с кластерами MnAs зависит от освещения, что связано с фотовозбужденными электронами, возникающими в p-типе GaAs полупроводника. Так как магнитосопротивление имеет квадратичную зависимость от подвижности свободных носителей, то вклад в магнитосопротивление фотовозбужденных электронов имеет более высокую величину по сравнению с дырками.

4. Методом низкотемпературной молекулярно-лучевой эпитаксии были получены образцы разбавленных магнитных полупроводников $Ga_{0.965}Mn_{0.035}As$.

5. При дополнительном легировании данных материалов немагнитной примесью Be наблюдалось увеличение температуры Кюри, вызванное увеличением концентрации носителей заряда.

6. Наличие локального пика вблизи температуры Кюри на температурной зависимости сопротивления ферромагнитных образцов $Ga_{0.965}Mn_{0.035}As$ было объяснено с помощью магнитопримесной теории рассеяния носителей заряда, предложенной Э.Нагаевым.

7. Был выполнен численный расчет значения энергии обменного взаимодействия между локальными электронами магнитных ионов и свободными дырками в разбавленном магнитном полупроводнике $Ga_{1-x}Mn_xAs$, величина которой показала теоретическую возможность получения магнитного полупроводника GaMnAs с температурой Кюри, приемлемой для создания на его основе различных электронных приборов.

Цитируемая литература:

1. E.L.Nagaev. Colossal magnetoresistance materials: manganites and conventional ferromagnetic semiconductors // Physics Reports. – 2001. - V.346. - P. 387-531.
2. E.L.Nagaev. Resistance peak and giant magnetoresistance of degenerate ferromagnetic semiconductors with arbitrary spin polarization. // Phys. Solid State. - 1997. - V 39. - P. 1415-1419.
3. Sh. U. Yuldashev, Hyunsik Im, V.Sh. Yalishev, C.S. Park, T.W. Kang, Sanghoon Lee, Y. Sasaki, X. Liu and J.K. Furdyna. Effect of additional nonmagnetic acceptor doping on the resistivity peak and the Curie temperature of $Ga_{1-x}Mn_xAs$ epitaxial layers. // Appl. Phys. Lett. - 2003. – V. 82. - P. 1206-1208.
4. T. Omiya, F. Matsukura, T. Dietl, Y. Ohno, T. Sakon, M. Motokawa, and H. Ohno. Magnetotransport properties of $(Ga,Mn)As$ investigated at low temperature and high magnetic field // Physica E. – 2000. - V.7. - P .976-980.
5. J. Schliemann, J.König, H.H.Lin and A.H.MacDonald. Limits on the Curie temperature of $(III,Mn)V$ ferromagnetic semiconductors // Appl.Phys. Lett. - 2001. – V. 78. - P. 1550-1552.

4. Основные результаты диссертации опубликованы в периодических журналах в виде научных статей:

1. Sh.U. Yuldashev, Hyunsik Im, V.Sh. Yalishev, C.S. Park, T.W. Kang, Sanghoon Lee, Y. Sasaki, X. Liu and J.K. Furdyna. Effect of additional nonmagnetic acceptor doping on the resistivity peak and the Curie temperature of $Ga_{1-x}Mn_xAs$ epitaxial layers // Appl. Phys. Lett. - 2003. – V. 82. - P.1206-1208.
2. Shavkat U. Yuldashev, Hyunsik Im, Vadim Sh. Yalishev, Chang Soo Park, Tae Won Kang, Sanghoon Lee, Yuji Sasaki, Xin Liu and Jacek K. Furdyna. Magnetoresistance of $Ga_xMn_{1-x}As$ epitaxial layers doped by Be // Jap. J. Appl. Phys. - 2003. – V. 42. - No.10. - P. 6256-6259.
3. Sh.U. Yuldashev, V.Sh. Yalishev, S.H. Lee, Y. Sasaki, X. Liu and J.K. Furdyna. Effect of additional nonmagnetic acceptor doping on the Curie temperature and magnetoresistance of $Ga_{1-x}Mn_xAs$ epitaxial layers // Proceeding of the 2 Uzbek-Korean International Symposium on «Quantum Functional Materials and Devices 2003» (Tashkent, October 14-15, 2002) - Özbekiston Fizika Jurnal.- 2003.- V.5.- No.2-3.- P.150-157.
4. Sh.U.Yuldashev, V.Sh.Yalishev, L.A.Nosova, T.W.Kang. Magnetic structures for spintronics. // Proceeding of the 1 Uzbek-Korean International Symposium on «Проблемы науки и технологии микроструктурированных твердых и мягких материалов» (Самарканд, 2-3 ноября 2000) - Özbekiston Fizika Jurnal.-2001.- V.3.- (No.1-2).- P. 89-92.
5. Sh.U.Yuldashev, V.Sh.Yalishev, L.A.Nosova, Y.Shon, T.W.Kang. Enhanced positive magnetoresistance effect in GaAs with nanoscale magnetic clusters under light illumination. // Proceeding of the 1 Uzbek-Korean International Symposium on «Проблемы науки и технологии микроструктурированных твердых и

мягких материалов» (Самарканд, 2-3 ноября 2000) - *Ozbekiston Fizika Jurnalı*.- 2001.-V.3.- (№.1-2).- P. 122-126.

6. Ялышев В.Ш., Юлдашев Ш.У., Канг Т.В., Хюнсик И. Эффект магнитосопротивления в эпитаксиальных слоях $Ga_{1-x}Mn_xAs$, допированных Ве // Материалы Республиканской Конференции Молодых Физиков (Улугбек, Ташкент, 3-4 декабря, 2002 г.) – Ташкент, 2002. - С. 60-61.

Соискатель:

Ялышев В.Ш.

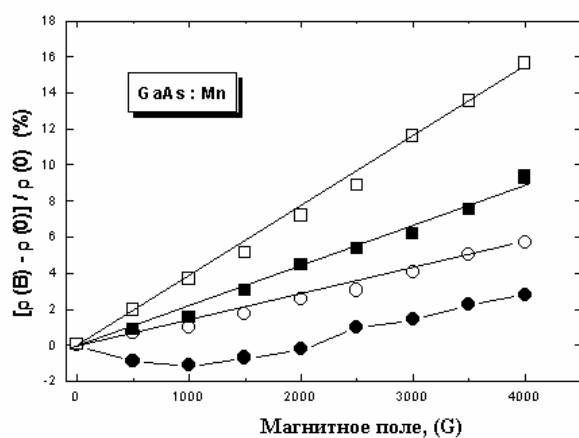


Рис.1. Зависимость магнитного сопротивления от напряженности магнитного поля образцов с дозой облучения ($5 \times 10^{15} \text{ см}^{-2}$), измеренного в темноте (●) и при освещении (○) красным светом и образцов с дозой облучения ($5 \times 10^{16} \text{ см}^{-2}$), в темноте (■) и при том же освещении (□).

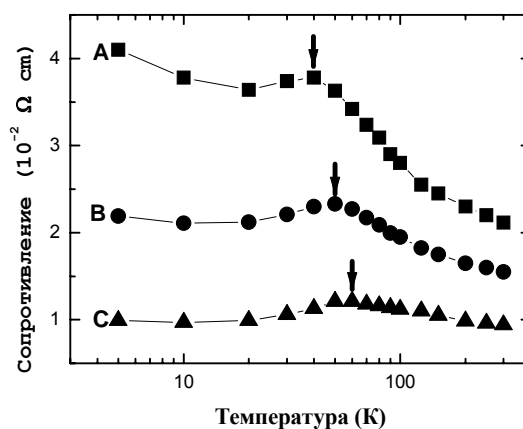


Рис. 2. Температурные зависимости удельного сопротивления для нелегированного (А) и легированных Be (В,С) образцов $\text{Ga}_{0.965}\text{Mn}_{0.035}\text{As}$

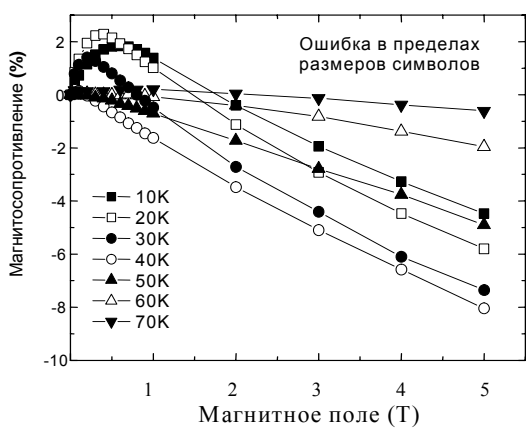


Рис. 3. Экспериментальные зависимости магнитосопротивления нелегированного $\text{Ga}_{1-x}\text{Mn}_x\text{As}$ ($x = 0.035$) образца, измеренные при разных температурах

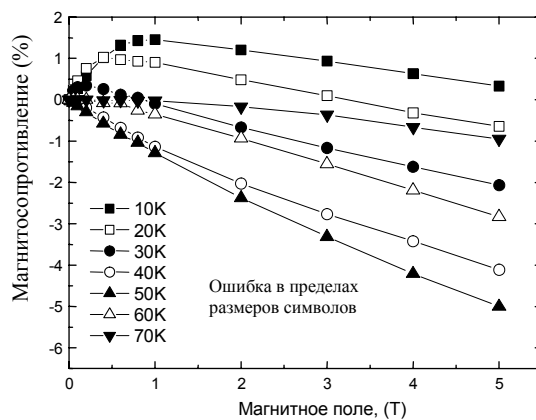


Рис. 4. Экспериментальные зависимости магнитосопротивления образца $\text{Ga}_{1-x}\text{Mn}_x\text{As}$ ($x = 0.035$), дополнительно легированного бериллием, измеренные при разных температурах

РЕЗЮМЕ

диссертации Ялышева Вадима Шамиловича на тему «Магнитосопротивление и температура Кюри полупроводников GaAs, легированных ионами Mn»

на соискание ученой степени кандидата физико-математических наук
по специальности 01.04.07 – физика твердого тела

Ключевые слова: разбавленные магнитные полупроводники, магнитосопротивление, ферромагнетизм, ионная имплантация, молекулярно-лучевая эпитаксия, магнитные кластеры, температура Кюри.

Объекты исследования: разбавленный магнитный полупроводник GaAs:Mn.

Цель работы: Цели и задачи исследований сводились к определению возможности увеличения температуры Кюри полученных разбавленных магнитных полупроводников на основе GaAs с магнитной примесью Mn.

Методы исследования: сверхпроводящий квантовый интерферометр (SQUID), эффект Холла, магнитосопротивление, атомный и магнитный силовые микроскопы.

Полученные результаты и их новизна:

1. Обнаружено влияние дополнительного легирования магнитных $\text{Ga}_{0,965}\text{Mn}_{0,035}\text{As}$ эпитаксиальных слоев немагнитной примесью Be на температуру Кюри.

2. Из измерений температурной зависимости сопротивления эпитаксиальных пленок $\text{Ga}_{0,965}\text{Mn}_{0,035}\text{As}$ с помощью магнитопримесной модели рассеяния носителей была определена энергия обменного взаимодействия в исследуемых материалах.

3. Обнаружено влияние размеров магнитных кластеров и освещения на магнитосопротивление GaAs образцов с содержащимися в них наноразмерными магнитными кластерами MnAs.

Практическая значимость: Вычисленная величина энергии обменного взаимодействия между локальными электронами магнитных ионов и свободными дырками в $\text{Ga}_{1-x}\text{Mn}_x\text{As}$ магнитных полупроводниках позволила оценить теоретическое значение величины температуры Кюри в зависимости от концентрации свободных дырок и сравнить ее с экспериментальными данными в указанных материалах.

Области применения результатов: микро- и наноэлектроника, физика твердого тела, физика полупроводников, физика магнитных материалов, источники спинполяризованного тока.

01.04.07 –қаттиқ жисмлар физикаси ихтисослиги бўйича физика-математика
фанлари номзоди илмий даражасига талабгор Ялышев Вадим

Шамиловичнинг

**«Mn ионлари билан легирланган GaAs яримўтказгичларнинг магнит
қаршилиги ва Кюри температураси »**

мавзусидаги диссертациясининг

ҚИСҚАЧА МАЗМУНИ

1. Калитли сўзлар: қоришмали магнит ўтказгичлари, магнит қаршилиги, ферромагнетизм, ионлар имплантацияси, молекуляр-нур эпитаксияси, магнит кластерлар, Кюри ҳарорати.

2. Тадқиқот объектлари: GaAs:Mn қоришмали магнит яримўтказгич.

3. Тадқиқотлар мақсади ва вазифалари: Mn магнит унсури киритиш билан олинган магнит қоришмали GaAs яримўтказгич асосида Кюри ҳароратини ошириш имкониятларини аниқлашга қаратилган.

4. Тадқиқотлар методлари: Ўта юқори ўтказувчан квант интерферометри (SQUID), Холл эффекти, магнит қаршилиги, атом ва магнитли кучланган микроскоплар.

5. Олинган натижалар ва уларнинг янгилиги:

1. $Ga_{1-x}Mn_xAs$ магнит эпитаксиал қатламларни Ве номагнит бўлган унсури билан қўшимча легирлашда Кюри ҳароратига кўрсатган таъсири биринчи марта топилди.

2. Тадқиқ этилган $Ga_{0.965}Mn_{0.035}As$ эпитаксиал қатламларда қаршилиқнинг шароратга боғлиқликдан сочилишнинг магнит унсур модели ёрдамида ўзаро таъсир алмашув энергияси биринчи марта аниқланди.

3. Наноўлчамли MnAs магнит кластерлари мавжуд бўлган GaAs намуналарда магнит кластерларининг ўлчами шамда ёруғликликнинг магнит қаршилигига таъсир этиши биринчи марта ўрганилди.

6. Амалий ахамияти: $Ga_{1-x}Mn_xAs$ яримўтказгичлардаги магнит ионларига тегишли локал электронлар ва эркин тешиқлар орасидаги ўзаро таъсир энергияси қийматини ҳисоблаб топиш эркин тешиқлар концентрациясига боғлиқ бўлган Кюри ҳарорати катталиқ қийматини назарий баҳолаш ва уни тажриба маълумотлари билан таққослаш имкониятларини берди.

7. Қўлланиш соҳаси: микро- ва наноэлектроника, қаттиқ жисмлар физикаси, ярим ўтказгичлар физикаси, магнит материаллар физикаси, спин-қутбланган ток манбалари.

RESUME

Thesis of Yalishev Vadim Shamilovich's
on the academic degree competition of the candidate of physics and mathematics
sciences, speciality 01.04.07 - solid state physics subject:

"Magnetoresistance and Curie temperature of GaAs semiconductor doped with Mn ions "

Key words: diluted magnetic semiconductors, magnetoresistance, ferromagnetism, ionic implantation, molecular-beam epitaxy, magnetic clusters, Curie temperature.

Subjects of the inquiry: Diluted magnetic semiconductor GaAs:Mn.

Aim of the inquiry: determination of the possibility of the increase of Curie temperature in diluted magnetic semiconductors based on GaAs doped with Mn magnetic impurity.

Method of inquiry: superconducting quantum interference device (SQUID), Hall effect, magnetoresistance, atomic and magnetic force microscopes.

The results achieved and their novelty:

1. The effect of the additional doping of $\text{Ga}_{0,965}\text{Mn}_{0,035}\text{As}$ magnetic epitaxial layers by nonmagnetic impurity of Be on the Curie temperature was revealed.
2. The exchange interaction energy in the investigated $\text{Ga}_{0,965}\text{Mn}_{0,035}\text{As}$ materials was determined by the means of the magnetic impurity dispersion model from the temperature dependence of the resistivity measurements.
3. The effect of magnetic clusters dimensions and illumination on the magnetoresistance of GaAs materials containing nano-dimensional magnetic clusters was studied for the first time.

Practical value: Calculated energy of the exchange interaction between local electrons of magnetic ions and free holes in $\text{Ga}_{1-x}\text{Mn}_x\text{As}$ magnetic semiconductors permitted to evaluate the theoretical meaning of Curie temperature depending on concentration of free holes and to compare it with experimental data.

Sphere of usage: micro- and nano-electronics, solid state physics, physics of semiconductors, magnetic materials physics, spin-polarized current sources.